

Description des produits minces réfléchissants

Un Produit Mince Réfléchissant (PMR), encore connu sous le nom de Barrière Thermique Réfléchissante (BTR), est un produit monocouche ou multicouche comportant une ou plusieurs feuilles peu émissives. Ces feuilles, de faible émissivité thermique, contribuent à l'isolation thermique des parois opaques du bâtiment en limitant les transferts par rayonnement. Les couches peuvent être constituées, de films avec ou sans bulles, de ouate synthétique, de mousse plastique expansée, de laine minérale ou d'origine animale ou végétale. Ces produits sont présentés sous forme de rouleaux, plaques ou panneaux et ont une épaisseur totale généralement comprise entre 5 et 30 mm.

Il existe deux grandes familles de produits réfléchissants : les produits à bulles représentés à la figure 1.2 par un film de polyéthylène emprisonnant des bulles d'air et les produits multicouches qui sont constitués d'une mousse plastique, ou une matière fibreuse en plusieurs couches séparées par des feuilles réfléchissantes intermédiaires (cf. figure 1.1).



Figure 1.1 - Isolant mince réfléchissant multicouche

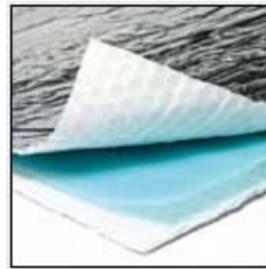


Figure 1.2 - Isolant mince réfléchissant à bulles

1.2.1 Principe de fonctionnement

Les PMR sont des produits dont les faces ont une faible émissivité thermique, qui peut varier de 0,05 à 0,2 selon les produits. Ces derniers ont donc la caractéristique de réfléchir une grande partie du rayonnement thermique incident et d'en émettre très peu.

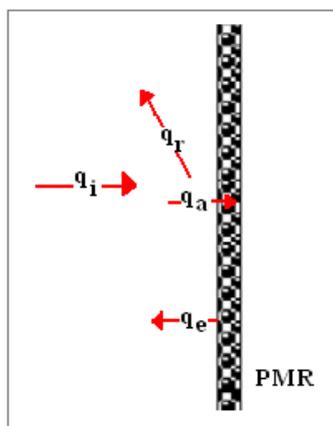


Figure 1.3 - Principe de fonctionnement du PMR

Les équations suivantes peuvent être tirées de la figure 1.3 :

$$q_r = (1 - \varepsilon) q_i \quad (1.1)$$

$$q_a = \alpha q_i = \varepsilon q_i^* \quad (\text{approximation des corps gris}) \quad (1.2)$$

$$q_e = \varepsilon M^0 = \varepsilon \sigma T_{PMR}^4 \quad (1.3)$$

(*) Valable car les PMR ne sont pas exposés directement au soleil, par suite on est à de grandes longueurs d'ondes pour l'absorption et l'émissivité.

Où q_i , q_r , q_a , et q_e représentent respectivement les densités de flux incident, réfléchi, absorbé et émis (W/m^2). Les paramètres α et ε sont les propriétés radiatives du PMR, respectivement le coefficient d'absorption et l'émissivité, T est la température du PMR, M^0 est l'émittance d'un corps noir dans les mêmes conditions de températures et σ est la constante de Stefan-Boltzmann.

Il ressort de ces équations que, pour une émissivité de 0,05 des faces réfléchissantes du PMR, seulement 5 % de l'énergie incidente est absorbée. Par ailleurs, en considérant que l'émissivité des matériaux généralement utilisés dans le bâtiment est de l'ordre de 0,9, un PMR, dans les mêmes conditions de température, émettra 5,5 % de l'énergie émise par les autres matériaux du bâtiment.

Pour que les PMR puissent fonctionner comme barrières au rayonnement infrarouge, il est par ailleurs indispensable que les faces réfléchissantes soient adjacentes à une ou deux lames d'air (respectivement d'un ou des deux côtés). Pour cela, la mise en œuvre de ces produits est très importante pour qu'ils puissent réduire le transfert thermique par rayonnement. Le PMR étant mince, sa simple résistance thermique intrinsèque ne suffit pas pour aboutir au niveau d'isolation souhaité.

1.2.2 Mise en œuvre

La contribution des PMR à l'isolation thermique des parois est étroitement liée à la mise en œuvre du produit sur le chantier et notamment l'aménagement ou non d'une (ou de deux) lame(s) d'air adjacente(s) au produit. Comme mentionné précédemment, la présence des lames d'air est très importante, elle permet aux feuilles réfléchissantes du PMR de réduire les échanges radiatifs dans le volume d'air améliorant ainsi la résistance thermique totale de la paroi.

Pour l'isolation des murs, ce type de produits nécessite l'aménagement d'une ou de deux lames d'air, de quelques centimètres d'épaisseur, intercalées entre l'isolant et les parements intérieur et extérieur pour permettre la réflexion du rayonnement. Le PMR posé doit être suffisamment tendu pour garantir la continuité et la constance de l'épaisseur des lames d'air. Il est important de noter qu'en contact avec un autre matériau solide, la feuille réfléchissante n'opère plus par rayonnement et le flux thermique traverse par conduction. D'autre part, les lames d'air doivent être étanches à l'air afin d'éviter la dégradation de la résistance thermique en cas d'infiltration d'air et la formation de boucles de convection naturelle.

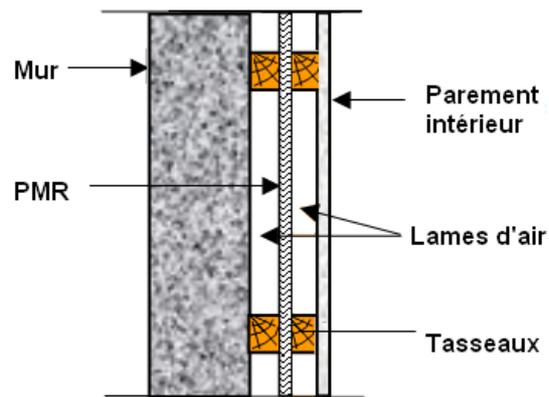


Figure 1.4 - Mise en œuvre au niveau d'un mur vertical

Au niveau des combles et des toitures, le PMR est utilisé seul ou en complément d'isolation. Quelle que soit la configuration, l'installation de ces produits exige la présence d'une ou de deux lames d'air de quelques centimètres d'épaisseur adjacentes au PMR.

Dans le cas de combles aménagés, et afin de mieux comprendre la pose du PMR, la structure d'une charpente traditionnelle est représentée à la figure 1.5.



Figure 1.5 - Charpente traditionnelle pour comble aménagé

Le premier type de pose consiste à fixer le PMR sous les chevrons entre les pannes comme représenté sur la figure 1.6. Il convient de s'assurer de l'étanchéité à l'air de la lame d'air éventuelle en sous face du produit réfléchissant. Une deuxième lame d'air peut être également conçue au-dessus du PMR. L'étanchéité de celle-ci doit être assurée, même si c'est difficile, par la pose d'un écran de sous-toiture.

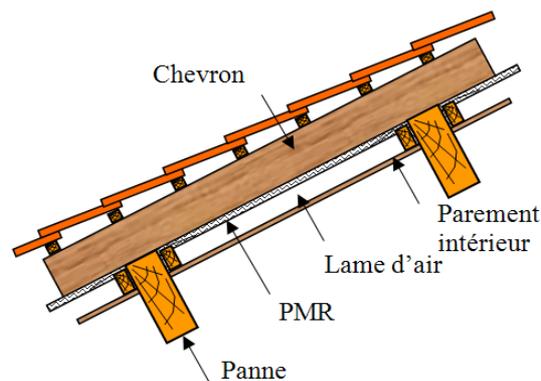


Figure 1.6 - Disposition du PMR en dessous des chevrons

Le deuxième type de pose consiste à fixer le PMR au-dessus des chevrons (figure 1.7). Le PMR, dans ce cas, remplit également la fonction d'un écran de sous-toiture. Pour cela, il doit être perméable à la vapeur d'eau pour éviter la condensation de l'accumulation d'humidité dans la charpente.

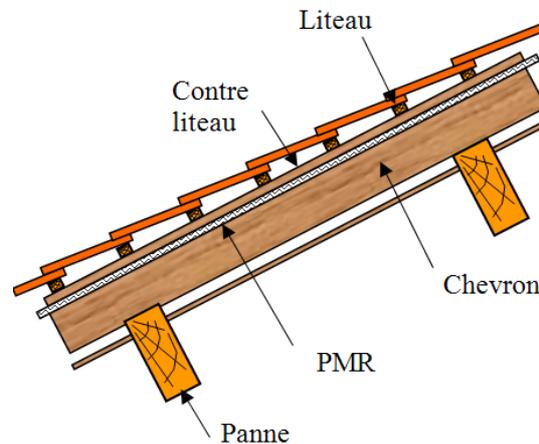


Figure 1.7 - Disposition du PMR au-dessus des chevrons (en écran de sous toiture)

Pour ce cas de pose, le PMR est en contact avec une lame d'air ventilée ménagée sous les tuiles. Cette lame d'air en face supérieure de la barrière est conseillée par les DTU de la série 40 [DTU, 40] qui imposent une certaine épaisseur et des sections de ventilation minimales à respecter.

1.3 Controverses existantes sur les performances des PMR intégrés dans le bâtiment

Depuis l'apparition des PMR sur les marchés mondiaux dans les années 70, plusieurs études expérimentales et théoriques ont été réalisées pour déterminer les performances thermiques des complexes de paroi du bâtiment intégrant ce genre de nouveaux produits d'isolation. On cite, comme exemple, celles de Yarbrough [Yarbrough, 1982], Holligsworth [Holligsworth, 1983] et Miller [Miller, 1990] qui ont montré que les calculs de la résistance thermique de ces complexes, à partir des données de l'Ashrae Handbook of Fundamentals, présentent des disparités avec les résultats de performance mesurés par boîte chaude gardée. Depuis lors, un doute existe sur la validité des calculs normatifs qui peuvent ne pas s'appliquer pour ces systèmes particuliers d'isolation.

Par ailleurs, depuis leur apparition jusqu'à l'heure actuelle, aucune norme spécifique n'a été établie pouvant leur conférer des performances thermiques certifiées. Pour cela, différents travaux ont été réalisés par la suite, chacun présentant une méthode d'évaluation différente et des résultats qui, pour certaines études, sont très différents. Ces travaux étudient principalement les performances thermiques des complexes de PMR et l'impact de leur installation dans les parois du bâtiment, généralement les combles et les murs. D'autres travaux évaluent les impacts de l'empoussièrement, de l'humidité et de la ventilation sur leur fonctionnement, ces derniers ne sont pas intégrés dans ce travail.

Dans le but d'évaluer les performances thermiques de ces produits, plusieurs avis techniques ont été publiés par le groupe spécialisé GS 20 [GS20] en charge de ces produits, des essais en environnement naturel et contrôlé ont été réalisés par des laboratoires indépendants et internationaux, et enfin des modèles de paroi intégrant ces systèmes d'isolation ont été établis. Ces travaux se divisent essentiellement en 4 types différents :

- Les études expérimentales in situ
- Les études expérimentales en laboratoire
- Les études par calculs normatifs
- Les études par calculs théoriques (modélisation numérique)

Le tableau 1.1 résume les résultats de performances thermiques obtenus par ces différentes études et publications.

Tableau 1.1 - Etudes et publications sur la caractérisation des performances thermiques des PMR

Organisme	Etudes	Mise en œuvre	Résultats	Validation
GS20 [GS20]	- Calculs normatifs (selon la méthode simplifiée des règles Th-U [Th-U] et normes européennes)	Pose directe sur plancher sans aménagement de lame d'air	Résistance thermique de 0,1 à 0,4 m ² .K/W	- Calcul suivant la norme NF EN ISO 6946 - Calcul par mesure selon la norme NF EN ISO 8990 -Essais réalisés en Amérique du Nord et en Europe
		Pose en mur et toiture avec aménagement d'une lame d'air	Résistance thermique de 0,2 à 1 m ² .K/W	
		Pose en mur et toiture avec aménagement de deux lames d'air	Résistance thermique de 0,3 à 1,7 m ² .K/W	
CSTB [CSTB, 2007]	- Essais comparatifs in situ sur deux cellules comparatives identiques à échelle 1: Une cellule est isolée avec du PMR muni de deux lames d'air, l'autre est isolée avec 20 cm de laine minérale (5 m ² .K/W) -Durée des essais : Période de 3 mois en hiver	- Conditions les plus favorables de mise en œuvre - Soins particuliers accordés à la perméabilité à l'air de l'enveloppe, aux ponts thermiques et aux déperditions du sol et de la porte. - Les parois (murs et toiture) sont constitués, de l'extérieur vers l'intérieur, d'un bardage, d'une lame d'air ventilée, de panneaux de contreventement OSB, de la laine minérale ou d'un système de PMR avec deux lames d'air et finalement d'un parement intérieur	Pour maintenir la même température de consigne à l'intérieur des cellules, celle isolée avec du PMR consomme deux fois plus d'énergie que la cellule isolée avec 20 cm de laine minérale	- Calcul suivant la norme NF EN ISO 6946

Organisme	Etudes	Mise en œuvre	Résultats	Validation
CSTC [CSTC, 2004] [CSTC, 2006]	- Essais en laboratoire : Plaque chaude gardée et dispositif de mesure d'émissivité - Deux types de flux traversant le complexe d'isolation ont été considérés : vertical ascendant et vertical descendant	PMR seul	- Résistance thermique intrinsèque de 0,2 à 0,6 m ² .K/W - Emissivité de 0,05 à 0,2	- Mesures semblables réalisés par le National Physical Laboratory (NPL) - Calculs selon la norme EN ISO 6946
		PMR couplé à deux lames d'air non ventilée	- Résistance thermique de 1 à 1,6 m ² .K/W (les lames d'air sont responsables de 70 % de cette valeur) - Le complexe PMR, posé de façon optimale, est équivalent à 6 cm de laine minérale	
	- Essais in situ sur la cellule PASLINK - Période hivernale	Plusieurs complexes intégrant du PMR et deux configurations de laine minérale ont été testés	-La résistance thermique d'un complexe PMR muni de deux lames d'air est inférieure d'environ 73 % par rapport à celle retrouvée pour un échantillon de 20 cm de laine minérale de conductivité thermique égale à 0,0322 W/m.K et de densité 25 kg/m ³ La résistance thermique du complexe de PMR est donc de l'ordre de 1,67 m ² .K/W	
NPL [NPL, 2004] [NPL, 2007]	- Essais en laboratoire : boîte chaude gardée rotative (BCGR) pour étudier différents systèmes d'isolation de toiture	- PMR (Tri-iso Super 10) seul et couplé à une lame d'air		- Calculs par un outil thermique et par la norme européenne BS ISO 15099
		- PMR (Tri-iso super 9) couplé à deux lames d'air	- Résistance thermique de 1,71 m ² .K/W	
	- Essais en laboratoire : Fluxmètre gardé, adapté pour des conditions de température variables	- Deux systèmes d'isolation comparés : une cavité d'air isolé avec du PMR et une avec de la laine minérale de faible densité	- Aucun avantage n'a été accordé au complexe isolé par le PMR	
BRE [BRE, 2005]	- Essais in situ	- PMR (Tri-iso super 9) couplé à 2 lames d'air non ventilées (paroi verticale)	- Résistance thermique égale à 1,72 m ² .K/W	- Essais à la boîte chaude gardée du NPL

Organisme	Etudes	Mise en œuvre	Résultats	Validation
LET [LET, 2007]	- Essais en laboratoire : dispositif expérimental sous forme de cubes emboîtés	- Complexe formé d'un PMR muni de deux lames d'air de 3 cm d'épaisseur chacune	- Résistance thermique globale maximale de $1,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ - cette valeur de résistance thermique globale est facilement détériorée par le vieillissement et la dégradation de l'émissivité des faces réfléchissantes du PMR ainsi que par la moindre ventilation des lames d'air - La résistance thermique d'une lame d'air ne peut en aucun cas dépasser les limites physiques liées à la conductivité thermique de l'air immobile	
Miranville [Miranville, 2002]	- Calculs théoriques : modélisation détaillée d'une cellule expérimentale in situ en se basant sur des simulations en régime dynamique puis obtention d'un modèle simplifiée de complexe de toiture	- Complexe formé d'une tôle, d'une lame d'air supérieure (10 cm) construite entre panne, d'un PMR, d'une lame d'air inférieure de faible épaisseur (1,6 cm) et d'un plafond	- Pour les situations les plus défavorables (absorption maximale du rayonnement solaire et absence de ventilation naturelle), les PMR ont une performance convenable pour ce genre de climat et répondent aux exigences réglementaires - Facteur de transmission solaire de 0,015 - Conductivité apparente du complexe de toiture de $0,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ - Résistance thermique globale de $3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	- Mesures in situ sur cellule expérimentale à échelle 1
	- Essais comparatifs en Réunion in situ sur des cellules de tailles réduites		- En comparant à une isolation traditionnelle des combles (tôle, lame d'air de 11,6 cm et plafond), l'ajout d'un PMR diminue le flux transmis à travers le complexe de toiture de 80 %.	

Organisme	Etudes	Mise en œuvre	Résultats	Validation
BM Trada [BMTRADA, 2005]	Essais comparatifs in situ	Tri-iso super 9	Pour garder la même température de consigne à l'intérieur, les cellules consomment la même quantité d'énergie. L'étude conclue que la résistance thermique globale est équivalente à celle de 200 mm de laine minérale ($5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$).	

Le tableau récapitulatif montre que les résultats des études expérimentales, réalisées en laboratoire, aboutissent à des résultats du même ordre de grandeur que ceux obtenus par calculs normatifs, que ce soit pour les performances thermiques intrinsèques du PMR ou du complexe global intégrant une ou deux lames d'air. Pour les résultats des essais in situ, certains laboratoires ont obtenu des résultats du même ordre de grandeur que ceux obtenus par calculs normatifs alors que d'autres mesurent des performances thermiques beaucoup plus élevées.

Le tableau 1.1 montre bien la contradiction des résultats in situ entre les différents laboratoires. En effet, ceci peut être dû aux grands nombres d'incertitudes liées à cette méthode de mesure en environnement réel. Parmi ces incertitudes figurent celles qui sont liées aux équipements de mesure et à la calibration des cellules. D'autres sont liés aux conditions climatiques extérieures variables et non contrôlables qui peuvent perturber les mesures et donner des résultats de performances thermiques erronés. Par ailleurs, la différence entre les résultats peut être également due à la mise en œuvre de l'isolation qui peut parfois ne pas répondre aux exigences réglementaires de pose et présenter des ponts thermiques importants qui faussent les résultats. Un autre facteur peut également jouer un rôle important dans la caractérisation des performances thermiques, c'est l'étanchéité à l'air ; plus la cellule est imperméable à l'air, plus les résultats sont proches de ceux calculés par les règles Th-U [Th-U] et les normes européennes. Il est donc important de contrôler par des tests de pressurisation l'étanchéité à l'air des cellules, surtout quand l'isolation est poreuse et doit être protégée par un pare-vapeur et un écran de sous-toiture.

Il est très difficile de relier la consommation énergétique de la cellule à la performance thermique de ces parois verticales ou de son rampant isolé. D'ailleurs, on utilise généralement les essais sur cellules in situ non pas pour déterminer les coefficients de déperditions thermiques à travers les parois mais pour comparer la performance de plusieurs systèmes d'isolation différents. Donc, on peut conclure que les essais in situ ne sont pas la bonne solution pour donner une valeur précise de résistance thermique pour les systèmes complexes d'isolation. Ils permettent uniquement de comparer la consommation énergétique entre des cellules parfaitement identiques construites avec soin suivant les règles de l'art.

Pour les calculs normatifs, comme on l'a déjà mentionné, il n'existe jusqu'à présent aucune norme dédiée aux calculs des performances thermiques des PMR seuls ou intégrés dans les bâtiments. Par contre, il existe depuis les années 90 des normes européennes et internationales de calcul et de mesure de la performance thermique de parois opaques du bâtiment. Ces normes sont énumérées et commentées dans ce qui suit.

Parmi les normes de calcul figure principalement la NF EN ISO 6946 [EN6946] qui permet de calculer la résistance thermique de parois opaques du bâtiment intégrant les matériaux d'isolation. Cette méthode calcule le coefficient de transmission thermique des parois comportant des composants thermiquement homogènes et pouvant comprendre des lames d'air. En effet, elle consiste à déterminer la résistance thermique individuelle de chaque

composant de la paroi considérée et d'en tirer la résistance thermique globale par superposition des couches.

Pour la détermination des performances thermiques d'une lame d'air suivant cette norme, l'épaisseur, l'émissivité des faces et le sens du flux thermique traversant cet élément de paroi (horizontal à travers un mur, vertical ascendant ou descendant à travers une toiture) sont pris en compte. Le degré de ventilation de la lame d'air est également considéré à savoir trois degrés de ventilation : non ventilé, faiblement et fortement ventilé. Par contre, cette norme de calcul considère que les résultats de résistances thermiques pour les lames d'air traversées par un flux vertical sont identiques à celles traversées par un flux faisant un angle jusqu'à plus ou moins 30 % par rapport à l'horizontale. En effet, la norme ne prend pas en compte d'autres angles d'inclinaisons pouvant exister dans le bâtiment, surtout au niveau de la toiture. Par ailleurs, l'écart de températures de part et d'autre des lames d'air, qui est un paramètre important dans la caractérisation du niveau d'isolation de ces cavités, n'est pas considéré.

Les industriels fabricants de fenêtres ou de parois vitrées intégrant des cavités d'air calculent la résistance thermique des lames d'air non ventilées selon la norme EN 673 [EN673] ou la norme BS ISO 15099 [EN15099]. Cette dernière donne des valeurs pour les coefficients d'échange convectif à l'intérieur des lames d'air pour des paramètres beaucoup plus variés comme l'inclinaison, le dimensionnement et les écarts de températures de part et d'autre de la cavité. Des tables de résistances thermiques de lames d'air en fonction des écarts de températures et de l'émissivité sont également listées dans ASHRAE Book of Fundamentals.

Les Règles Th-U [Th-U] calculent également les coefficients moyens de déperdition par transmission (Valeur-U) de toutes les parois du bâtiment. Pour les cavités d'air, la méthode de calcul simplifiée de la résistance thermique d'après les règles Th-U est conforme à celle donnée par les normes NF EN ISO 6946 [EN6946] et NF EN ISO 10211 [EN10211]. En effet, les règles Th-U calculent les performances des lames d'air en fonction de l'émissivité, de l'orientation du flux thermique, de l'épaisseur de la lame d'air et du degré de ventilation.

Pour ce qui est des normes de mesures, la résistance thermique globale du PMR avec lame(s) d'air peut être mesurée directement par boîte chaude gardée selon la norme NF EN ISO 8990 [EN8990]. Cette dernière comprend tous les modes de transfert thermique. Le principe de la boîte chaude gardée consiste à placer un sandwich comportant les différents composants d'une paroi entre deux ambiances, froide et chaude, contrôlées et de mesurer en régime stationnaire le flux thermique traversant le sandwich en fonction de l'écart de températures établi de part et d'autre. Cette méthode de mesure prend en compte les trois modes de transfert de la chaleur, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement, et peut intégrer dans les résultats la perte de chaleur à travers les ponts thermiques présents dans la paroi. Par contre, le flux thermique traversant le sandwich est toujours horizontal, à l'exception de la boîte chaude gardée inclinable du NPL. Ce dispositif peut mesurer les performances thermiques de parois inclinées. La boîte chaude gardée rotative est utilisée généralement quand les parois à tester intègrent des composants dont les performances thermiques dépendent de l'inclinaison. C'est le cas des lames d'air intégrées dans des parois non verticales du bâtiment puisque l'écoulement de convection naturelle dans ces cavités dépend de l'angle d'inclinaison entre le flux traversant et l'accélération gravitationnelle.

Une autre méthode de mesure de la résistance thermique des matériaux du bâtiment existe, c'est la mesure par plaque chaude gardée ou fluxmètre conformément aux normes NF EN 12664 et 12667 [EN12664]. Ces deux méthodes sont généralement utilisées pour déterminer la résistance thermique intrinsèque d'un matériau.

La technique de mesure par plaque chaude gardée consiste à placer un échantillon du matériau entre deux plaques de températures constantes, l'une chaude et l'autre froide. La mesure du flux thermique traversant permet donc de retrouver la résistance thermique du matériau. Cette méthode représente une incertitude liée aux résistances de contact avec les plaques, surtout quand le matériau n'est pas rigide et peut présenter des ondulations durant la fixation. Dans le cas des produits réfléchissants, la mesure de la résistance thermique intrinsèque peut parfois présenter une grande incertitude puisque les résistances thermiques additives créées par les bulles d'air sont d'autant plus importantes que l'émissivité des faces du matériau est réduite.

D'autre part, le fluxmètre est un dispositif de mesure qui est placé en contact avec l'échantillon de conductivité inconnue et doté de capteurs de température placés de part et d'autre du matériau à tester. Cet appareil de mesure délivre une tension électrique proportionnelle au flux thermique traversant le matériau et calcule par la suite la conductivité thermique intrinsèque. Cette méthode de mesure est la moins précise car elle représente, en plus des incertitudes de mesures retrouvées pour la plaque chaude gardée, une erreur de calibration du dispositif puisque ce dernier doit être calibré au préalable, avant chaque essai, à l'aide d'échantillons étalons.

A défaut de norme spécifique, pour déterminer la résistance thermique totale d'une paroi isolée par un PMR adjacent à une ou deux lames d'air, la démarche suivante est généralement adoptée. La résistance thermique intrinsèque du PMR est mesurée par plaque chaude gardée ou par fluxmètre suivant les deux normes suivantes, NF EN 12664 et NF EN 12667. L'émissivité des faces réfléchissantes du PMR est mesurée suivant une méthode comparable à celle utilisée pour les vitrages à couches, EN 12898 [EN12898]. Les ponts thermiques existant dans la construction des quadrillages de lames d'air ou dans la fixation du produit isolant sont calculés d'après la norme NF EN ISO 10211. La résistance thermique des lames d'air peut être calculée d'après la norme EN 15099. Enfin, la résistance totale du complexe peut être calculée suivant la norme NF EN ISO 6946.

Pour conclure sur les calculs normatifs, il n'existe donc aucune norme dédiée qui regroupe en elle seule le calcul détaillé de tous les transferts thermiques existant dans les parois complexes intégrant les PMR et les lames d'air. Les normes de calcul existantes pour la caractérisation des performances thermiques des produits d'isolation donnent, par superposition, un ordre de grandeur et non pas une valeur exacte pour ce genre de produit. Il n'y a que la mesure par boîte chaude gardée qui semble être la meilleure méthode expérimentale d'évaluation.

1.3.1 Conclusions sur l'étude bibliographique

La synthèse des travaux sur les PMR présente donc des disparités quant aux performances effectives des PMR une fois intégrés dans les parois du bâtiment. Certaines études montrent que ces isolants sont suffisants comme unique isolation des bâtiments, d'autres trouvent que ces produits doivent être utilisés uniquement en complément d'isolation puisque seuls, ils n'ont pas les caractéristiques isolantes suffisantes qui répondent aux exigences réglementaires actuelles.

Les normes de calculs semblent parfois être non représentatives des phénomènes qui interviennent au niveau des parois comportant des PMR surtout au niveau des lames d'air. En effet, la conduction et le rayonnement sont bien définis. Le problème semble être donc le

transfert convectif à travers les lames d'air qui n'est pas bien défini dans les normes. En effet, l'écoulement de convection naturelle à travers ces dernières est fonction de plusieurs facteurs alors que les normes ont des données simplifiées et sur des plages de variation restreintes qui peuvent ne pas représenter tous les cas de figures. Par ailleurs, les mesures sur les cellules en environnement réel présentent un niveau élevé d'incertitude et ne donnent pas de résultats précis et fiables.

La plupart des études confirment que la boîte chaude gardée de grande échelle est le dispositif le plus adapté pour mesurer les performances thermiques des complexes de PMR puisqu'il prend en compte tous les modes de transfert de chaleur. Il existe un nouveau dispositif, disponible uniquement au NPL : le concept de la boîte chaude gardée inclinée. Ce dispositif permet de donner des mesures de performances thermiques pour les parois complexes inclinées intégrant des lames d'air. La direction du flux à travers ces complexes est très importante dans la détermination du coefficient d'échange convectif. Ce dispositif est extrêmement coûteux et lourd à mettre en œuvre.

Par contre, certains clament que cette seule mesure de résistance thermique n'est pas suffisante pour caractériser thermiquement ces produits et des interrogations persistent quant à la validité de ces résultats, en réalité quand le complexe est exposé aux conditions thermiques réelles existantes autour du bâtiment.

1.3.2 Méthodologie de travail

Compte tenu de cette controverse sur les méthodes de caractérisation des PMR, une méthodologie a été mise en place dans ce travail afin de permettre une caractérisation thermique fiable et une évaluation complète des PMR. Cette méthodologie exclut les essais en environnement naturel et les calculs normatifs. Elle est constituée tout d'abord par une modélisation détaillée de l'ensemble des phénomènes thermiques ayant lieu dans les complexes de bâtiment intégrant les PMR, à savoir les parois verticales et les rampants de toiture. Une validation de ces modèles est ensuite réalisée par des mesures en environnement contrôlé sur un dispositif bien adapté. C'est une boîte chaude calibrée verticale qui peut également être inclinée.

Pour la modélisation, la démarche de découplage des phénomènes est particulièrement choisie afin d'étudier le transfert convectif à part pour mieux comprendre le mouvement d'air à l'intérieur des lames d'air fermés (dans le cas des complexes de parois verticales et les combles) et ouvertes (dans le cas de la lame supérieure ventilée de la toiture). Dans un premier temps, elle consiste à découpler les phénomènes thermiques ayant lieu dans les complexes de parois verticales et les combles intégrant des PMR, ensuite à modéliser chaque mode de transfert thermique indépendamment et, par la suite, à coupler tous les phénomènes dans une modélisation thermique nodale du même type que les modélisations utilisées dans la plupart des codes de calcul du bâtiment. Cette démarche de découplage respecte les lois des transferts de chaleur puisqu'elle consiste à étudier la convection naturelle séparément et la remplacer par un coefficient d'échange convectif moyen, pour le cas d'une lame d'air fermée, et par des coefficients d'échanges convectifs et un débit massique, pour le cas de la lame d'air ventilée. Ces termes représentant les échanges thermiques par convection sont introduits dans un solveur thermique THERMETTE représentant les complexes de parois verticales et de toiture. Ces derniers sont formés par le PMR, les lames d'air et tous les autres composants du bâtiment nécessaires à la mise en œuvre de ces complexes comme, par exemple, les éléments de fixation, les tasseaux pour la constitution des lames d'air et enfin la charpente.

Tout d'abord, pour l'étude des lames d'air fermées ménagées de part et d'autre du PMR, un travail de simulation numérique est réalisé dans le chapitre 2 à l'aide d'un code CFD dont l'objectif principal est la détermination des paramètres intervenant dans l'écoulement de convection naturelle. Ce travail de modélisation est comparé aux études similaires trouvées dans la littérature. Une corrélation pour le coefficient d'échange convectif moyen en fonction des différents paramètres est établie. Elle est valable pour de grands intervalles de fonctionnement et pour les différents cas de figures présents dans le bâtiment.

Pour la lame d'air ouverte (ou thermosiphon) présente sous les tuiles et dont la mise en œuvre est demandée par les règles de construction et les normes européennes, le phénomène d'écoulement d'air est étudié dans le chapitre 3 par une approche expérimentale basée sur des mesures de Vélocimétrie par Image de Particules (PIV). Ces essais sont utilisés d'abord pour valider une modélisation CFD du thermosiphon. Puis le modèle est utilisé pour compléter les essais par une étude paramétrique. Les résultats des essais et des simulations déterminent alors les paramètres intervenant dans le phénomène de convection naturelle à l'intérieur du thermosiphon. Ceci permet la définition de corrélations pour le débit d'air et les coefficients d'échanges convectifs à l'intérieur de la cavité ouverte.

Après avoir modélisé le transfert convectif et l'écoulement d'air à travers des lames d'air, un couplage de modèles conductif, convectif et radiatif est réalisé à l'aide du logiciel THERMETTE dans le chapitre 4 pour un complexe de paroi verticale et inclinée intégrant un PMR et des lames d'air non ventilées. Les corrélations trouvées au Chapitre 2 sont alors utilisées. Une expérimentation basée sur le principe de la boîte chaude calibrée verticale et inclinée est utilisée pour valider le modèle réalisé.

Le chapitre 5 étudie le modèle de toiture complexe développé en utilisant la même approche de couplage de modèles. Les lames d'air, fermée et ouverte, sont alors représentées par les coefficients d'échanges convectifs correspondants calculés dans les chapitres 2 et 3. Deux types de modélisation sont établis. Le premier modèle est réalisé pour des conditions estivales ; ensoleillement et absence de vent. Ce dernier étudie l'influence de différents paramètres sur le facteur de transmission solaire du complexe de toiture modélisé. Les résultats d'essais réalisés par le CSTB sur un dispositif de comble à échelle 1 valident les résultats du modèle en conditions estivales ainsi développé. Le deuxième modèle de toiture est réalisé pour la période hivernale. Ce modèle prend en compte la porosité des tuiles et l'influence de la ventilation sur les débits d'air dans la lame d'air ouverte. Les performances thermiques du complexe de rampant isolé sont alors évaluées en fonction de plusieurs paramètres.

Enfin, une conclusion est établie sur les performances thermiques des PMR. Elle englobe les résultats du travail de modélisation et des essais. Une évaluation complète est obtenue sur les performances réelles de ces produits intégrés dans les parois verticales du bâtiment et les combles.